

# **ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ И СООТНОШЕНИЕ МАССА—СВЕТИМОСТЬ**

**О. Ю. Малков**

*Институт астрономии РАН*

В работе обсуждаются наблюдательные типы двойных звезд, для компонентов которых возможно определение динамических масс. Такие данные являются уникальным источником для построения соотношения «масса—светимость» — фундаментального закона, использующегося, в частности, для получения начальной функции масс, которая, в свою очередь, полностью определяет структуру и эволюцию звездных ансамблей.

## **BINARY STARS AND THE MASS—LUMINOSITY RELATION**

**O. Yu. Malkov**

*Institute of Astronomy RAS*

Observational types of binary stars for which components dynamical masses could be determined, are discussed. These data serve as a unique source for construction of the mass-luminosity relation, a fundamental law, which is especially important for getting of the initial mass function, which in turn fully determines structure and evolution of stellar systems.

## **Введение**

Масса звезды — важнейший параметр, в первом приближении полностью определяющий ее эволюцию. Начальная функция масс (НФМ), т. е. распределение образующихся звезд по массам, — фундаментальное распределение, определяющее строение и эволюцию звездных ансамблей. Масса — параметр, динамически не определяемый для одиночной звезды, поэтому для оценки звездных масс разработаны опосредованные методы. Самый широко распространенный из них — определение из наблюдений распределения исследуемого звездного ансамбля (звезд поля, скопления) по другому параметру, чаще всего — светимости, и последующий переход к массам

звезд с помощью так называемого соотношения «масса—светимость» (СМС).

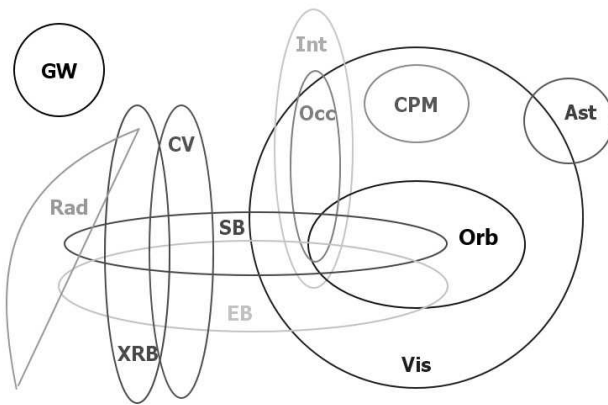
Независимое определение массы звезды и ее светимости возможно только для компонентов двойных систем определенных типов. В работе описываются различные наблюдательные типы двойных и обсуждаются ситуации, в которых становится возможным определять массы компонентов. Представлены результаты построения по этим данным соотношений «масса—светимость» малых и умеренных масс.

Следует отметить, что в последнее время появились оценки масс для ряда звезд, полученные методами астросейсмологии. Однако полученные таким образом массы пульсаторов непригодны для применения к «обычным» звездам с целью получения полезных соотношений и распределений (таких как начальная функция масс и соотношение «масса—светимость»).

## Наблюдательные типы двойных систем

Наблюдательные типы двойных систем продемонстрированы на рисунке. Ниже дается краткое описание типов (детали можно найти в [1] и [2]):

- визуальная двойная (**Vis**) — двойная система, в которой наблюдаются и разрешаются в телескоп оба компонента;
- орбитальная двойная (**Orb**) — визуальная двойная, показывающая достаточно заметное орбитальное движение, чтобы можно было определить орбитальные элементы;
- пара с общим собственным движением (**СРМ**) — две звезды, разделенные на небе несколькими угловыми секундами или минутами и имеющие схожие по направлению и абсолютному значению собственные движения. Предполагается, что эти звезды связаны общим образованием и имеют одинаковые возраст и химсостав;
- астрометрическая двойная (**Ast**), или система с невидимым компонентом. Может быть обнаружена из наблюдений периодических изменений положения звезды (накладывающихся на собственное движение), вызванных ее обращением с невидимым компонентом вокруг общего центра масс;
- интерферометрическая двойная (**Int**) — представляет ситуацию, когда два компонента слишком близки друг к другу чтобы наблюдаться в телескоп по отдельности, но могут быть разделены интерферометрическими методами;



#### Наблюдательные типы двойных систем

- покрываемая двойная (**Occ**) — обнаруживается с помощью фотоэлектрического анализа покрытия Луной или астероидом очень тесной пары;
- в спектроскопической двойной (**SB**) изменение лучевых скоростей компонентов двойной звезды можно наблюдать спектроскопически: линии в комбинированном спектре двух компонентов периодически раздваиваются или смещаются (так называемые SB2 и SB1 соответственно);
- затменная двойная (**EB**) — двойная система, в которой один из компонентов периодически затмевается другим, что приводит к изменению видимой яркости системы;
- рентгеновская двойная (**XRB**) — тесная пара звезд, испускающая рентгеновское излучение, которое производится веществом, перетекающим с одной звезды на другую;
- катаклизмическая переменная (**CV**) — тесная двойная, испытывающая перенос вещества между компонентами и демонстрирующая внезапные увеличения блеска, возникающие от термоядерных вспышек;
- радиопульсар в двойной системе (**Rad**) демонстрирует перио-

- дические изменения периода радиопульсаций, вызванные орбитальным движением;
- недавно открытые гравитационно-волновые сигналы, испускаемые при слиянии компактных объектов (черных дыр звездных масс, нейтронных звезд), привело к появлению нового наблюдательного типа двойных систем — гравитационно-волновая двойная (**GW**).

Размеры областей на рисунке не соответствуют относительному количеству известных двойных соответствующих наблюдательных типов. Перекрытия областей указывают на тот факт, что некоторые двойные могут быть открыты и исследованы двумя или более наблюдательными методами. Так, на перекрытии областей **Vis** и **SB** находятся хорошо известные разрешенные спектроскопические двойные (**RSB**).

Отметим, что область **GW** в настоящее время изолирована, однако позже, когда вместе с регистрацией гравитационных волн от слияния нейтронных звезд будет зарегистрировано рентгеновское излучение (гамма-излучение уже регистрируется), эта область перекроется с областью **XRB**.

## Определение масс компонентов двойных систем

Орбитальные элементы (большая полуось  $a$ , наклон орбиты  $i$ , позиционный угол  $\Omega$ ) и параметры компонентов (масса  $m$ , радиус  $R$ ), принципиально определяемые для трех наблюдательных типов двойных, перечислены в таблице. Остальные орбитальные элементы (эксцентриситет  $e$ , период обращения  $P$ , момент прохождения  $T$  и долгота  $\omega$  периастра) определяются для всех указанных типов двойных. Тригонометрический параллакс обозначен символом  $\pi$ .

Из таблицы можно видеть, в частности, что массы компонентов можно определить для **Orb+SB2** или **SB2+EB** систем (для последних еще и радиусы). Именно эти данные используются для построения соотношения «масса—светимость».

## Соотношение «масса—светимость»

Один из наблюдательных типов двойных систем, для компонентов которых возможно независимое определение массы звезды и ее светимости, — орбитальные двойные (визуальные двойные звезды с

	Orb	SB	EB
$a$	$a\pi$	$a_1 \sin i$ [SB1], $a \sin i$ [SB2]	no
$i$	yes	no	yes
$\Omega$	$+ 180^\circ$ ?	no	no
$m$	$\pi^3 \Sigma m$	$f(m)$ [SB1], $m \sin^3 i$ [SB2]	no
$R$	no	no	$R/a$

известными параметрами орбиты и тригонометрическим параллаксом). Эти звезды, как правило, представляют собой широкие пары, компоненты которых не взаимодействуют друг с другом и в эволюционном смысле аналогичны одиночным звездам. Кроме того, это, как правило, звезды ближайшей солнечной окрестности и, следовательно, преимущественно маломассивные. Проблема определения масс компонентов орбитальных двойных обсуждалась, например, в работах [3–5], а в статьях [6–9] исследовалась задача построения СМС для маломассивных звезд, основанного на данных о таких звездах.

Другим основным источником независимых определений масс служат разделенные затменные двойные звезды с компонентами на главной последовательности, в спектре которых представлены линии обоих компонентов (double-lined eclipsing binaries, DLEB). Это, как правило, сравнительно массивные ( $M/M_\odot > 1.5$ ) звезды с орбитальными периодами от десятков суток, их параметры используются для построения СМС звезд умеренных и больших масс. Точные параметры DLEB-звезд и СМС, построенные на их основе, могут быть найдены, например, в работах [10–14].

При совместном анализе и использовании этих двух СМС (построенных на основе данных об орбитальных двойных и данных о DLEB-звездах с компонентами на главной последовательности), а также для того, чтобы сравнивать теоретические СМС с эмпирическими данными, обычно по умолчанию предполагалось, что компоненты разделенных тесных и широких двойных эволюционируют одинаково. Необходимо, однако, отметить, что DLEB — это тесные пары, вращение компонентов которых синхронизовано приливным взаимодействием, и эволюционируют они, из-за замедления вращения, иначе, чем «изолированные» (т. е. одиночные или входящие в широкие двойные системы) звезды.

При сравнении радиусов DLEB и одиночных звезд в работе [15] было обнаружено заметное различие между наблюдательными пара-

метрами B0V–G0V компонентов DLEB и одиночных звезд аналогичных спектральных классов. Это различие подтвердилось при анализе независимых исследований, опубликованных другими авторами. Такое различие объясняет и несогласие опубликованных шкал болометрических поправок. Большие радиусы и более высокие температуры A–F компонентов DLEB-звезд могут объясняться синхронизацией и связанным с ней замедлением вращения таких компонентов в тесных системах. Другой возможной причиной является эффект наблюдательной селекции: из-за несферичности вращающихся звезд определяемые из наблюдений значения параметры зависят от ориентации их осей вращения. Изолированные звезды ориентированы случайным образом, а компоненты затменных двойных, как правило, наблюдаются со стороны экватора. Систематически меньшие наблюдательные радиусы DLEB звезд спектрального класса В могут объясняться тем, что звезды с большими радиусами не встречаются в разделенных парах с компонентами на главной последовательности: они в основном уже заполнили свои полости Роша (что остановило их дальнейший рост) и стали полуразделенными системами (что исключило их из обсуждаемой статистики).

Затем в работе [16] были собраны данные о фундаментальных параметрах компонентов немногих известных на сегодняшний день долгопериодических DLEB. Эти звезды предположительно не претерпели синхронизации вращения с периодом орбиты и, следовательно, вращаются быстро и эволюционируют аналогично одиночным звездам. По-видимому, только такие данные следует использовать для построения соотношений (в частности, соотношения «масса—светимость») для «изолированных» звезд в диапазоне  $M/M_{\odot} > 2.7$ . Массы компонентов других типов двойных звезд (орбитальных, разнесенных спектрально-двойных) редко превышают этот предел.

Имеющихся наблюдательных данных по долгопериодическим (т. е. не синхронизованным) двойным явно недостаточно для построения надежного СМС в диапазоне умеренных звездных масс. Используемое же в настоящее время в диапазоне  $M/M_{\odot} > 2.7$  СМС базируется на данных, полученных для тесных (т. е. синхронизованных) DLEB, а его применение распространяется затем и на одиночные звезды. По-видимому, такое использование СМС неправомерно и приводит к систематически неправильным результатам как при оценивании с его помощью характеристик звезд обсуждаемого диапазона масс, так и при восстановлении с его помощью начальной функции масс.

В настоящее время ведутся наблюдательные программы по спектральным исследованиям долгопериодических затменных двойных с целью определения масс их компонентов и реконструкции соотношения «масса—светимость» звезд умеренных масс.

## Заключение

Благодаря данным космического проекта Gaia в ближайшее время следует ожидать активного интереса исследователей к проблемам, связанным с эволюцией звездного населения Галактики. В этих исследованиях необходимой составляющей является СМС звезд поля и получаемая с его помощью НФМ. Новые наблюдения и последующий анализ позволят продвинуться в направлении построения истинного соотношения «масса—светимость» и соответственно пересмотреть НФМ для звезд с массами  $M/M_{\odot} > 2.7$ . Этот результат будет востребован для построения НФМ, основанной на огромном количестве объектов из будущих больших обзоров: наземного проекта LSST и космического — Gaia.

Автор благодарит Д. Ковалеву за постоянную помощь в работе.

## Библиографические ссылки

1. *Kovaleva D.* Astronomical data resources for binary and multiple stars // *Baltic Astronomy*. — 2015. — Vol. 24. — P. 446—452.
2. *Malkov O., Kovaleva D., Kaygorodov P.* Observational Types of Binaries in the Binary Star Database // *Stars: From Collapse to Collapse* / ed. by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin : *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2017. — Vol. 510. — P. 360.
3. *Docobo J. A., Tamazian V. S., Malkov O. Y. et al.* Improved orbits and parallaxes for eight visual binaries with unrealistic previous masses using the Hipparcos parallax // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 459. — P. 1580—1585. 1609.03392.
4. *Malkov O. Y., Tamazian V. S., Docobo J. A., Chulkov D. A.* Dynamical masses of a selected sample of orbital binaries // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 546. — P. A69.
5. *Fernandes J., Lebreton Y., Baglin A., Morel P.* Fundamental stellar parameters for nearby visual binary stars: eta Cas, XI Boo, 70 OPH and 85 Peg. Helium abundance, age and mixing length parameter for low mass stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 338. — P. 455—464.

6. *Henry T. J.* The Mass-Luminosity Relation from End to End // Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of the Close Binary Stars / ed. by R. W. Hilditch, H. Hensberge, K. Pavlovski : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2004. — Vol. 318. — P. 159–165.
7. *Delfosse X., Forveille T., Ségransan D. et al.* Accurate masses of very low mass stars. IV. Improved mass-luminosity relations // Astron. Astrophys. — 2000. — Vol. 364. — P. 217–224. [astro-ph/0010586](#).
8. *Henry T. J., Franz O. G., Wasserman L. H. et al.* The Optical Mass-Luminosity Relation at the End of the Main Sequence (0.08-0.20  $M_{\text{Solar}}$ ) // Astrophys. J. — 1999. — Vol. 512. — P. 864–873.
9. *Malkov O. Y., Piskunov A. E., Shpil’Kina D. A.* Mass-luminosity relation of low mass stars. // Astron. Astrophys. — 1997. — Vol. 320. — P. 79–90.
10. *Torres G., Andersen J., Giménez A.* Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications // Astron. Astrophys. Rev. — 2010. — Vol. 18. — P. 67–126. [0908.2624](#).
11. *Kovaleva D. A.* Age and Metallicity Estimates for Moderate-Mass Stars in Eclipsing Binaries // Astronomy Reports. — 2001. — Vol. 45. — P. 972–983.
12. *Gorda S. Y., Svechnikov M. A.* Determination of empirical mass-luminosity and mass-radius relations for main-sequence stars that are the components of eclipsing binary systems // Astronomy Reports. — 1998. — Vol. 42. — P. 793–798.
13. *Andersen J.* Accurate masses and radii of normal stars // Astron. Astrophys. Rev. — 1991. — Vol. 3. — P. 91–126.
14. *Popper D. M.* Stellar masses // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 1980. — Vol. 18. — P. 115–164.
15. *Malkov O. Y.* Eclipsing binaries and the mass-luminosity relation // Astron. Astrophys. — 2003. — Vol. 402. — P. 1055–1060.
16. *Malkov O. Y.* Mass-luminosity relation of intermediate-mass stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2007. — Vol. 382. — P. 1073–1086.